

УДК 53.087.3:543.423

**Н. Н. Никульченков<sup>1\*</sup>, Э. Г. Мурадян<sup>1</sup>, А. Б. Логинов<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Уральский федеральный университет», г. Екатеринбург<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва

\*nikolai.nikulchenkov@urfu.ru

Научные руководители: проф., д-р техн. наук М. Л. Лобанов; начальник лаборатории Национального исследовательского университета МИЭТ  
Б. А. Логинов

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ СОСТОЯНИЙ В АМОРФНОМ СПЛАВЕ FINEMET МЕТОДОМ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Методом зондовой сканирующей микроскопии проанализирован рельеф поверхности образцов магнитомягкого аморфного сплава Finemet в исходном состоянии и после отжига при 550 и 700 °С в течении 20 минут. Проведено сравнение расчетов размеров областей когерентного рассеяния и результатов измерения их предполагаемых аналогов непосредственно на рельефе поверхности образцов сплава.

*Ключевые слова:* металлическое стекло, Finemet, структура, область когерентного рассеяния, зондовая сканирующая микроскопия

**N. N. Nikul'chenkov, E. G. Muradyan, A. B. Loginov**

## STRUCTURAL STATES INVESTIGATION IN FINEMET AMORPHOUS ALLOY BY PROBE MICROSCOPY TECHNIQUE

The surface topography of soft magnetic nanocrystalline Finemet alloy specimens has been showed by probe microscopy technique. Comparison of coherent scattering regions calculations and measurements of it suggested analogues immediately on alloy surface topography has been conducted.

*Key words:* metallic glass, Finemet, structure, coherent scattering region, probe scanning microscopy

**Из** существующих в настоящее время металлических стекол, сплав Finemet, благодаря возможности аморфизироваться при спи-

нинговании, приобретая высокие магнитные свойства в нанокристаллическом состоянии [1], входит в небольшое число аморфных материалов, которые производятся в промышленных масштабах, ежегодно измеряемых в тысячах тонн [2]. В связи с этим не ослабевает интерес исследователей к разработке новых химических составов аморфных сплавов [3] или модифицирования уже известных [4]. При этом до настоящего времени структура аморфных сплавов остается предметом научных исследований и дискуссий [5].

В работе [6] методами терморентгенографического, калориметрического и дилатометрического анализов изучались фазовые и структурные переходы в магнитомягком сплаве  $\text{Fe}_{72,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_2\text{Mo}_{1,5}\text{Si}_{14}\text{B}_9$  типа Finemet при нагреве. Результаты показали, что в процессе повышения температуры отжига сплав может переходить из аморфного состояния в нанокристаллическое (530–570 °С) и затем в рекристаллизованное при более высоких температурах. Помимо этого, используя дифрактограммы, были рассчитаны размеры областей когерентного рассеяния (ОКР) для каждого из трех состояний:  $\sim 20 \text{ \AA}$  — исходное, аморфное состояние;  $\sim 70 \text{ \AA}$  — нанокристаллическое;  $\sim 300 \text{ \AA}$  — рекристаллизованное.

Настоящая работа посвящена анализу поверхности структуры аморфного магнитомягкого сплава  $\text{Fe}_{72,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_2\text{Mo}_{1,5}\text{Si}_{14}\text{B}_9$  типа Finemet в трех состояниях и сравнению с результатами расчетов ОКР.

Первый образец в исходном состоянии был аморфной лентой, второй образец был отожжен в вакуумной печи при температуре 550 °С в течение 20 минут и третий — при температуре 700 °С.

Для проведения исследования поверхности сплава использовался зондовый сканирующий микроскоп СММ-2000 [7] (изготовитель — завод ПРОТОН, г. Москва). Применялись зонды (кантилеверы) фирмы Brucker (США) марки «MSCT» с радиусом закругления острия 2 нм. С использованием программного обеспечения микроскопа СММ-2000 в соответствии с международным стандартом ISO 1302 определялись средняя шероховатость ( $Ra$ ), а также полный размах высот рельефа ( $Rz$ ) и «средний размер зерна» как диаметр Ферре ( $D$ ).

Результаты исследования зондовой микроскопии представлены на рис., измеренные данные занесены в табл.

Таблица

Результаты расчетов ОКР и зондовой сканирующей микроскопии

Температура отжига, °С	ОКР, нм	$D$ , нм	$R_z$ , нм	$Ra$ , нм
Без отжига	2	15	4	0,2
550	7	26	25	2,8
700	30	124	19	1,2

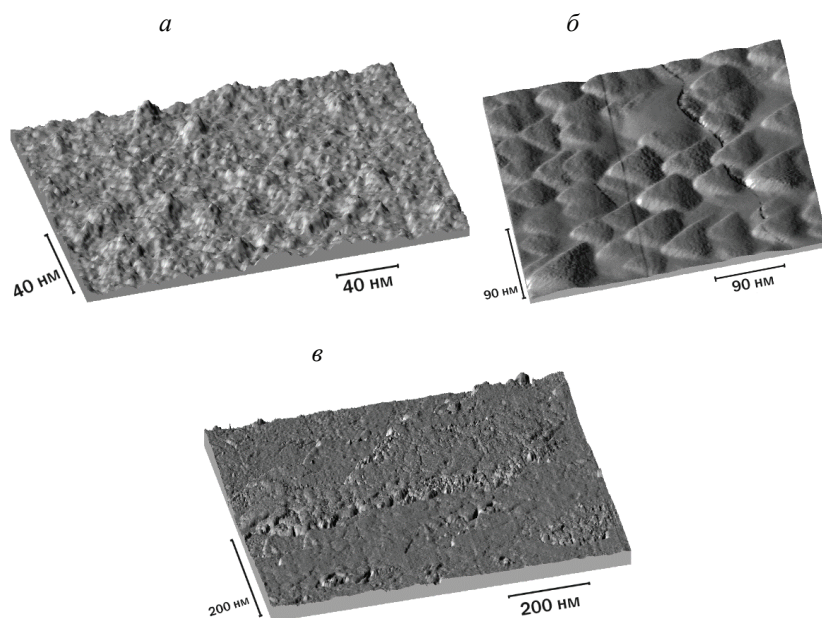


Рис. Рельеф поверхности образцов магнитомягкого аморфного сплава  $Fe_{72,5}Cu_1Nb_2Mo_{1,5}Si_{14}B_9$  типа Finemet, выявленный зондовой микроскопией:

$a$  — исходное состояние;  $b$  — нанокристаллическое состояние;  
 $v$  — рекристаллизованное состояние

Результаты расчетов ОКР и средние размеры «зерен» во всех случаях отличаются в несколько раз. При этом увеличение размеров ОКР с повышением температуры коррелирует с увеличением размеров «зерен», определенных по рельефу поверхности. В будущем планируется провести более корректное сопоставление результатов данных методов. Интересно отметить, что изображения зондовой микроскопии как для аморфного, так и нанокристаллического состояния характери-

зуются относительно правильными геометрическими формами, в особенности это касается нанокристаллического состояния.

### Литература

1. Herzer G. Nanocrystalline soft magnetic alloys // Handbook of magnetic materials. 1997. V. 10. 415–462.
2. Inoue A., Takeuchi A. Recent development and application products of bulk glassy alloys // Acta Materialia. 2011. V. 59. P. 2243–2267.
3. Suryanarayana C., Inoue A. Bulk metallic glasses. Boca Raton : CRC Press LLC, 2011. 525 p.
4. An assessment of binary metallic glasses: correlations between structure, glass forming ability and stability / D. B. Miracle [et al.] // International Materials Reviews. 2010. V. 55. P. 219–256.
5. Cheng Y. Q., Ma E. Atomic-level structure and structure–property relationship in metallic glasses // Progress in Materials Science. 2011. V. 56. P. 379–473.
6. Фазовые и структурные превращения в нанокристаллическом сплаве  $\text{Fe}_{72,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_2\text{Mo}_{1,5}\text{Si}_{14}\text{B}_9$  / Н. Н. Никульченков [и др.] // Письма о материалах. 2019. Т. 9, № 1. С. 64–69.
7. Few-layer graphene formation by carbon deposition on polycrystalline Ni surface / A. B. Loginov [et al.] // Appl. Surf. Sci. 2019. V. 494. P. 1030–1035.